DOI: 10.5846/stxb201606081103
王广成,曹飞飞.基于演化博弈的煤炭矿区生态修复管理机制研究.生态学报,2017,37(12):4198-4207.
Wang G C, Cao F F.The management mechanism of ecological restoration in a coal mining area based on evolutionary game.Acta Ecologica Sinica,2017,37(12):4198-4207.

基于演化博弈的煤炭矿区生态修复管理机制研究

王广成[1,*],曹飞飞[1,2]
1 山东工商学院 管理科学与工程学院, 烟台 264005
2 山东师范大学 管理科学与工程学院, 济南 250014

摘要:地方政府环境监管部门和煤炭企业是煤炭矿区生态修复保证金制度实施的重要责任主体。从演化博弈论的研究视角探讨了地方政府与煤炭企业在生态修复保证金制度实施中的决策演化过程,构建了地方政府与煤炭企业演化博弈模型,根据复制动态方程规律得到了参与者的行为演化规律和行为演化稳定策略,分析了生态修复保证金制度实施的策略选择影响因素。选择龙口矿区为研究对象进行了实证研究,结果表明:地方政府的监管力度随煤炭企业的生态修复比例变化而变化,生态修复初期比例低;随着地方政府监管力度加大,生态修复比例相应提高,地方政府可以适当放松监管,但监管力度应保持在一定范围内,确保系统向最优状态演化。可通过动态调节保证金收缴金额,增加税收优惠,降低煤炭企业的治理成本,加强对地方政府环保政绩考核,引导地方政府与煤炭企业共同促进煤炭矿区生态修复工作有效实施。

关键词:煤炭矿区;生态恢复;保证金制度;演化博弈;数据仿真

The management mechanism of ecological restoration in a coal mining area based on evolutionary game

WANG Guangcheng[1,*], CAO Feifei[1,2]
1 *School of Management Science and Engineering, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai* 264005, *China*
2 *School of Management Science and Engineering, Shandong Normal University, Ji'nan* 250014, *China*

Abstract: Local governments and coal enterprises are recognized as important subjects of liability in implementation of the ecological restoration of mine deposit systems. From the perspective of evolutionary game theory, this study has explored the evolution of local government and coal enterprises' decision-making in implementation, constructed evolutionary game models, discovered the participants' behavior evolution law and evolutionary, stable strategies based on a replicator dynamics equation, and analyzed the factors that influence the choice of implementation strategies. The Longkou mining area in Shandong Province was selected as an empirical research object. The results show that the governmental supervision changes with the enterprises' ecological restoration degree, which is originally low. As the supervision is strengthened and ecological restoration improves, the local government may advisably loosen control to a certain extent, which ensures that the mechanism will evolve toward the optimal state. This is assumed to lead the local government and coal enterprises to jointly promote the ecological restoration by means of dynamically adjusting the amount of deposit, increasing tax incentives, reducing the restoration costs for coal enterprises, and strengthening the local government's environmental performance assessment.

Key Words: coal mining areas; ecological restoration; deposit system; evolutionary game theory; simulation data

基金项目:国家自然科学基金项目(71273158)
收稿日期:2016-06-08; **修订日期**:2017-01-19
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gcwang658@ sina.cn

煤炭资源开采在支持和带动矿区经济社会发展的同时,也引发地表塌陷、植被破坏、空气污染、地下水系破坏等严重的生态环境问题。生态修复成为煤炭矿区复合生态系统的重要管理手段之一。2006 年我国实施的矿山环境治理与生态修复保证金制度[1],对矿区的生态恢复与环境治理起到了积极的促进作用,但也暴露了保证金收缴不到位、用途不透明,对煤炭企业开展生态恢复活动监管缺失,地方政府监管不力,对生态环境损害责任人追责问责形同虚设等一系列问题。以矿山环境治理与生态修复保证金制度研究作为主线,深入系统研究生态恢复的管理问题,对于促进煤炭矿区环境治理与生态恢复具有重要的理论意义与现实意义。

20 世纪 70 年代,美国、加拿大、英国、德国、澳大利亚发达国家先后制定了比较完备的矿山土地修复保证金制度,以规范矿山企业的治理行为。Jason F. Shogren 认为发行环保债券是控制环境污染的有效工具之一,并探讨了应用于露天采矿生态修复与农业非点源污染控制的有效途径[2]。Costanza 认为,实施生态修复保证金制度来避免政府对市场环境的干扰,对低成本高效率的生态治理技术创新具有推动力[3]。David Gerard 对矿区土地复垦保证金的担保机理进行分析,通过保证金将不履约风险从公众转移到私人部门,有效利用企业声誉来确保顺利实施[4]。Philip Peck 认为财政担保为矿主进行复垦与履行环境责任提供重要手段,进一步分析了财政担保政策的作用效果[5]。目前,国外保证金制度的立法完备,收缴标准和期限明确,保证金收缴方式多样,实行矿区环境治理保证金制度的发达国家的矿山土地复垦率一般在 50%—70%。

国内学者对保证金制度的研究起步较晚,主要集中于保证金制度的理论基础和设计原则,实施问题以及保障机制等方面。张凤麟根据我国矿山复垦立法现状与存在的问题,借鉴美国、加拿大、澳大利亚等发达国家的复垦立法与保证金制度,对矿山环境治理保证金制度的治理标准、复垦程序、缴纳依据提出了建议[6]。陈德敏认为经济激励下的环境成本内部化是保证金的经济学基础[7]。燕守广分析了保证金制度实施中的标准低、形式单一、分期返还难以实施的诸多问题,并提出相关建议[8]。冯春涛从经济学角度剖析了当前矿山地质环境治理激励机制面临的问题,提出矿山地质环境治理激励机制体系[9]。张维宸从法律角度对我国矿山地质环境恢复治理保证金制度进行研究,建议加快保证金制度的立法工作[10]。程琳琳对比了国内外矿区土地复垦保证金制度的实施现状,认为我国保证金制度还处于初级阶段,在征收标准、测算方法、公众参与方面有待进一步完善[11]。徐大伟基于合谋与防范的角度建议在矿山环境恢复治理保证金制执行中实施严格的公众参与与第三方监督[12]。但是,目前国内生态环境治理保证金制度的实施,存在执行标准偏低、收缴方式单一、企业治理积极性不高等问题,同时,保证金制度的实施又涉及众多的利益群体,利益相关方利益关系错综复杂。对这一课题的研究需要运用演化博弈理论进行深入系统探讨,可望取得预期的成果。

而随着 1973 年,Smith、Price 提出了演化稳定策略的概念[13]与 Talor 、Jonker 在 1978 年提出的复制者动态方程概念[14],标志着演化博弈理论体系的正式形成,西方学者开始运用演化博弈理论分析一系列社会、经济、制度问题。Friedman 运用演化博弈研究日本与美国企业组织结构模式的形成、类型及演变规律[15]。E. Akiyamaa 认为动态系统本质就是一场博弈,博弈随参与人的行为与状态的变化而变化,并通过简单的单人博弈模拟动态系统中资源有效利用的演化过程[16]。Michael 运用演化博弈研究绿色供应链管理中政府环境规制对制造商的碳排放行为的影响[17]。此后,国内学者也开始关注和应用演化博弈理论解释社会问题。钟锦[18]以淮河流域为研究对象,运用演化博弈研究水环境污染控制系统中经济群体间的竞争合作动态演化过程,分析淮河流域经济群体合作的进化制度的形成过程,为淮河流域的水环境控制提供理论依据。潘峰、西宝等基于演化博弈的地方政府环境规制策略分析,探讨地方政府、排污企业与中央政府的决策演化过程[19]。吕军通过对中央政府与地方政府以及地方政府与采矿企业的利益关系分析,得出混合战略纳什均衡解,并提出矿区地质环境治理的政策建议[20]。张学刚等在现有的政企博弈中引入政治成本与声誉成本,对政府环境监管与企业污染治理的互动决策进行深入探讨[21]。赵黎明等研究政府部门与旅游企业在低碳发展决策中的演化博弈,从动态角度剖析其发展路径与影响因素,为低碳监督策略提供参考[22]。

可见,演化博弈论能够更为深刻、更切实际地解释相互依存、相互影响的利益相关者之间的行为策略选择及演化过程,但目前博弈理论在煤炭矿区生态修复与环境治理决策分析中的应用并不多见。本文运用演化博

弈理论，建立了地方政府环境监管部门与煤炭企业的博弈模型，探讨生态修复保证金制度实施中地方政府环境监管部门与煤炭企业的行为策略选择，分析相关主体的行为互动机制，从动态演化的角度考察地方政府的博弈均衡策略及其影响因素，并以龙口矿区为研究对象进行实证研究，为确定合理的保证金收缴额提供理论依据，为实施多样化的收缴方式、加强对煤炭企业开展治理环境与生态恢复的监管、促使地方政府加大监管力度与问责力度提出相应的管理建议。

1 煤炭企业与地方政府环境监管部门演化博弈模型

煤炭矿区复合生态系统管理相关方——煤炭企业、政府环境监管部门、矿区居民的利益诉求不同，错综复杂的利益关系极易造成矛盾冲突，管理相关方时刻进行着博弈，只有协调兼顾管理相关方的利益诉求，才能实施有效的复合生态系统管理。

煤炭企业以经营利润的最大化为目标。为了减少成本支出，煤炭企业消极被动的开展环境治理工作，以逃避社会责任。只有在有效的环境规制下，煤炭企业才可能遵循循环经济的理念，增加生态恢复与环境治理费用，承担起相应的社会责任。

地方政府追求区域稳定和经济增长。一方面，地方政府应根据中央政府的战略目标，制定资源合理开发政策，对矿区生态恢复与环境治理进行监管；另一方面，地方政府忽视了对生态环境的统一规划和治理，通过煤炭资源开发促进地方经济的快速增长。

1.1 煤炭企业与地方政府环境监管部门之间的博弈关系

在煤炭资源开采与环境治理中，煤炭企业与地方政府之间利益纠葛错综复杂，既有矛盾又有合作。一方面，煤炭企业通过煤炭资源开采经营获取收益，同时带动地方经济的发展，向地方政府缴纳企业所得税、资源税、增值税以及矿产资源补偿费等税费，增加地方政府的财政收入，这使得地方政府和煤炭企业存在着一定利益共享，严重影响地方政府的监管效力。另一方面，地方政府作为国家资源的管理监督者，必须维护公众的利益，有效监督与惩治破坏矿区生态环境的企业行为，监督煤炭企业的生态修复与环境治理。但是，煤炭企业基于经济人的角色，追求自身的利益最大化，地方政府缺乏有效的监管，煤炭企业逃避环境规制，多开采少治理，减少环境治理成本。尤其地方政府对由国资委管理的国有企业缺乏高度的控制力，在最终目标不一致的情况下必然会产生矛盾。因此，双方既存在着合作关系又存在着矛盾关系。地方政府与煤炭企业博弈的重点主要包括两个方面：一是生态环境管理和生态恢复费用的投入和保证金用途问题；二是生态环境管理和追责问责问题。因而需要对这些问题进行深入研究，厘清关系，提出对策。

1.2 模型基本假设

(1)在有限理性假设下，煤炭企业和地方政府环境监管部门是博弈的两个参与群体。反复在两个群体中随机抽取，随意配对，进行博弈。随着博弈进行，双方会相互学习，调整策略。

(2)当地方政府环境监管部门对企业开展生态修复进行监管时，它的策略为监管；反之，当政府环境监管部门安于现状，监管频率低，其策略为监管不力。政府的策略空间为 S={监管，监管不力}。企业上缴环境治理与生态修复保证金后，按照国家规定完成环境治理时，其策略为完全治理；反之，对生态修复采取消极态度，其又迫于政策压力，完成部分环境治理时，策略为部分治理。煤炭企业的策略空间为 V={完全治理，部分治理}。地方政府环境监管部门和煤炭企业选择某种策略的期望收益与平均收益之间的关系决定其采取何种策略。

(3)参变量定义：C 为企业完成环境治理与生态修复的成本费用；T 为企业所缴纳的生态修复保证金；S 为地方政府的监管成本；P 为企业完成生态修复与环境治理时所获得的生态经济效益；W 为企业完成生态修复与环境治理时地方政府的税收优惠；M 为企业完成治理，政府监管时，地方政府环境监管部门所获得的社会效益；θ 为地方政府环境监管部门的努力程度，也可以表现为政府环境规制下，企业逃避监督被发现和惩处的概率；k 为煤炭企业的生态修复比例，p 为煤炭企业群体中采用"完全治理"策略的比例，采用"部分治理"策

略的比例为 $1-p$;q 为地方政府群体中采用“监管”策略的比例,采用“监管不力”策略的比例为 $1-q$。

(4)假设企业完全修复时,所获得的生态经济效益为 P,煤炭企业受制于政策环境规制,部分治理的生态经济效益与治理比例成线性关系,为加大环境规制执行力度,当企业完成部分治理时,且被政府发现时,保证金不予归还,一部分用于进一步治理企业的生态环境,另一部分作为企业的处罚金;若没被发现,保证金会归还企业,且会得一定的税收优惠,而部分生态环境未得以恢复。

1.3 模型的构建与求解

情景 1　当地方政府进行监管,企业完全治理时,保证金全部归还企业,煤炭企业总的治理成本为 C,且会得到地方政府的税收优惠,则地方政府会支付一定的监管成本和减免部分税收,会带来一定的环境效益与社会效益,则煤炭企业和地方政府的收益分别为 $-C+W$, $-S-W+P+M$;而当企业部分治理时,被地方政府监管部门发现时,保证金被地方政府没收用于生态修复,如果未被发现,企业会获得生态修复保证金和政府的税收优惠,而只有部分生态环境效益得以体现。则煤炭企业和地方政府的收益分别为

$$-kC-\theta T+(1-\theta)W, -S+\theta T+(1-\theta)(kP-W)$$

情景 2　当地方政府不进行监管或监管不力,企业完全治理时,煤炭企业和地方政府的收益分别为 $-C$, P;而当企业部分治理时,由于地方政府没有进行监管,保证金被企业所获得,破坏的生态环境部分恢复,则煤炭企业和地方政府的收益分别为 $-kC$, kP。

煤炭企业和地方政府之间的支付矩阵如表 1 所示。

表 1　演化博弈模型收益矩阵

Table 1　Benefit matrix for evolutionary game model

煤炭企业 Coal enterprise		地方政府 Local government: 监管	监管不力
	完全治理	$-C+W$	$-C$
		$-S-W+P+M$	P
	部分治理	$-kC-\theta T+(1-\theta)W$	$-kC$
		$-S+\theta T+(1-\theta)(kP-W)$	kP

给定 q,煤炭企业群体选择完全治理的期望收益为:

$$U_{11}=q(-C+W)+(1-q)(-C)=qW-C \tag{1}$$

选择部分治理的期望收益为:

$$\begin{aligned} U_{12}&=q(-kC-\theta T+(1-\theta)W)+(1-q)(-kC) \\ &=qW-kC-q\theta T-q\theta W \end{aligned} \tag{2}$$

煤炭企业群体的平均期望收益为:

$$\overline{U_1}=pU_{11}+(1-p)U_{12} \tag{3}$$

则煤炭企业群体选择完全治理策略的复制动态方程为:

$$\dot{f}_{(p)}=\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=p(U_{11}-\overline{U_1}) \tag{4}$$

可得:

$$\dot{f}_{(p)}=\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}t}=p(1-p)(kC-C+q\theta T+q\theta W) \tag{5}$$

给定 p,地方政府群体选择监管的期望收益为:

$$\begin{aligned} U_{21}&=p(-S-W+P+M)+(1-p)(-S+\theta T+(1-\theta)(kP-W)) \\ &=-S-W+\theta T+\theta W+kP-k\theta P+p(P+M-\theta T-\theta W-kP+k\theta P) \end{aligned} \tag{6}$$

选择监管不力的期望收益为:

$$U_{22}=pP+(1-p)(kP)=pP+kP-pkP \tag{7}$$

地方政府群体平均期望收益为:

$$\overline{U_2}=qU_{21}+(1-q)U_{22} \tag{8}$$

则地方政府选择监管策略的复制动态方程为:

$$\dot{f}_{(q)}=\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}=q(U_{21}-\overline{U_2}) \tag{9}$$

可得：

$$\dot{f}_{(q)} = \frac{dq}{dt} = q(1-q)(-S-W+\theta T+\theta W-k\theta P)+p(M-\theta T-\theta W+\theta kP) \quad (10)$$

联立复制者动态方程(5)、(10)，可以得到一个二维的动力系统，该系统描绘了地方政府群体、煤炭企业群体的动态演化过程。令 $\dot{f}_{(p)}=0, \dot{f}_{(q)}=0$，即系统策略选择的变化率为零时，可得到该系统的均衡点分别为：

$$(0,0)(0,1)(1,0)(1,1)\ \left(\frac{S+W-\theta T-\theta W+\theta kP}{M-\theta T-\theta W+\theta kP}, \frac{C-kC}{\theta T+\theta W}\right)$$

1.4 系统演化稳定性分析

由复制动态方程(5)、(10)所组成的动态系统由平衡点A(0,0)B(1,0)C(0,1)D(1,1)，且当 $0<p^*, q^*<1$ 时，$E(p^*, q^*)$ 也是系统的一个平衡点。对于该动态系统，其雅克比矩阵为 $J=\begin{bmatrix}\frac{\partial \dot{f}_{(p)}}{\partial p} & \frac{\partial \dot{f}_{(q)}}{\partial q}\\ \frac{\partial \dot{f}_{(q)}}{\partial p} & \frac{\partial \dot{f}_{(q)}}{\partial q}\end{bmatrix}$，将(5)、(10)式带入可得其雅克比矩阵为：

$$J=\begin{bmatrix}(1-2p)(kC-C+\theta qT+\theta qW) & p(1-p)(\theta T+\theta W)\\ q(1-q)(M-\theta T+\theta kP-\theta W) & (1-2q)(\theta T-\theta kP+\theta W-S-W+p(M-\theta T-\theta W+\theta kP))\end{bmatrix}$$

可以得到该系统各稳定状态的稳定性分析结果如表2所示。

表2 系统演化稳定性分析结果

Table 2 Analysis result on system evolutionary stability

均衡点 Equilibrium point	Det(J)	Tr(J)	稳定性 Stability	条件 Condition
(0,0)	+	—	ESS	$\theta T+\theta W-\theta kP-S-W<0$
(1,0)	—	+—	不稳定点	任意条件
(0,1)	+	-	ESS	$kC-C+\theta T+\theta W<0$ $-(\theta T+\theta W-\theta kP-S-W)<0$
(1,1)	+	—	ESS	$-(kC-C+\theta T+\theta W)<0$ $-(-S-W+M)<0$
(p*, q*)	—	0	鞍点	任意条件

ESS：演化稳定策略 evolutionarily stable strategy；* 表示演化稳定策略点

表达式中，令 $E_1=\theta T+\theta W-\theta kP-S-W$，$E_2=C-kC-\theta T-\theta W$，$E_3=-S-W+M$。其中 E_1 为企业部分治理时地方政府监管时地方政府的净收益；E_2 为企业部分治理被发现时的净收益；E_3 为企业完全治理时地方政府的净收益。通过对煤炭企业和地方政府环境监管部门演化博弈及均衡点稳定性的分析，可知演化系统的稳定性有以下几种情况：

(1)当 $E_3>0, E_1<0, E_2>0$ 时，即地方政府进行监管的成本大于监管发现企业部分治理时所避免的损失且小于企业完全治理时所获得的社会效益，煤炭企业部分治理所节约的成本大于被发现时的损失时，此时，地方政府的监管努力度满足 $\theta<\min\left(\frac{C-kC}{T+W}, \frac{S+W}{T+W-kP}\right)$，此时，(0,0)具有局部稳定性，系统最终演化为监管部门监管不力，煤炭企业部分治理的稳定状态。

(2)当 $E_3>0, E_2<0, E_1>0$ 时，即地方政府进行监管的成本小于监管发现企业部分治理时所避免的损失且小于企业完全治理时所得到的社会效益，煤炭企业部分治理所节约的成本小于被发现时的损失时，此时，地方政府的监管努力度满足，$\theta\geq\max\left(\frac{C-kC}{T+W}, \frac{S+W}{T+W-kP}\right)$，(1,1)具有局部稳定性，不管系统的初始状态如何，系统最终演化为地方政府监管，煤炭企业完全治理的稳定状态。

(3) $E_2>0, E_1>0$，即煤炭企业部分治理所节约的成本小于被发现时的损失时，地方政府进行监管的成本小

于监管发现企业部分治理时所避免的损失时，此时，地方政府的监管努力度满足，$\frac{S+W}{T+W-kP}<\theta<\frac{C-kC}{T+W}$，(0,1)具有局部稳定性，系统最终演化为煤炭企业部分治理，地方政府监管的稳定状态。

(4) $E_3>0,E_2<0,E_1<0$ 时，即地方政府进行监管的成本大于监管发现企业部分治理时所避免的损失，而小于企业完全治理时所获得的社会效益，煤炭企业部分治理所节约的成本小于被发现时的损失时，此时 $\frac{C-kC}{T+W}<\theta<\frac{S+W}{T+W-kP}$，此时(0,0)，(1,1)具有局部稳定性，是该动态系统的演化稳定策略，则最终的演化稳定状态取决于其演化的初始路径，当 $p<p^*$，$q<q^*$ 时，系统最终演化为煤炭企业部分治理，地方政府监管不力的稳定状态，当 $p>p^*$，$q>q^*$ 时，系统最终演化为企业完全治理，地方政府监管的稳定状态。

(5) $E_3<0,E_1>0,E_2<0$，地方政府进行监管的成本小于监管发现企业部分治理时所避免的损失且大于企业完全治理时所获得的社会效益，煤炭企业部分治理所节约的成本小于被发现时的损失时，此时系统不管初始状态如何，系统最终无法达到演化稳定状态。

系统演化稳定性分析结果表明，实施保证金制度的初期，由于相关制度规范缺失，技术人才配备不到位，保证金收缴困难，地方政府难以落实切实可行的监督措施，煤炭企业开展环境治理的积极性不高。但随着政策的完善，企业生态恢复与环境治理技术水平的提高，地方政府环境监管部门通过有效的监督手段引导企业进行生态恢复与环境治理，随着政府监管力度的加大，企业治理积极性提高，当监管努力度处于高频率时，煤炭企业选择完全治理，但随着时间的推移，地方政府又容易放松监管，导致企业以一定的比例治理环境，系统将呈现严格监管与监管不力，完全治理与部分治理共存的状态。

2　实证研究

2.1　龙口矿业集团概况

龙口矿矿业集团现有梁家煤矿、北皂煤矿，位于胶东半岛北部的龙口市境内。北皂煤矿是国内首座实施海下采煤的矿井，矿区面积为 29.6 km^2，核定生产能力 225 万 t/a；梁家煤矿矿区面积约为 48 km^2，核定生产能力为 280 万 t。

2.2　龙口矿区演化博弈分析

(1)生态修复与环境治理情况

煤炭矿区环境地质问题为采空区塌(沉)陷、固体废弃物等堆放和废水排放对土壤和水体的污染和生态资源的破坏等，因此煤炭矿区地质环境治理成本主要包括塌陷土地治理费用、水资源治理费用和植被修复治理费用、固体废弃物(煤矸石)处理费用。龙口矿区生态修复与环境修复治理费用如表 3 所示。

表 3　矿区生态恢复与环境治理费用

Table 3　Cost of ecological restoration and environment harness in Coal Mining Area

费用类别 Cost category	恢复情况 Restoration state	费用总额 Total cost/万元
土地塌陷治理费用 Cost of collapsed land restoration	平均每年的塌陷总面积为 0.416 km。土地塌陷治理成本为 22 万元/hm^2	915.21
水环境治理费用 Cost of water purified	对水体的污染与破坏为 295.212 万 t/a，单位处理成本 0.78元/t	222.13
煤矸石处理费用 Cost of coal gangue treatment	所产生的煤矸石全用于土地塌陷的填充与道路的修建	0
植被恢复费用 Cost of vegetation restoration	每开采 1 万 t 煤炭破坏植被面积土地 0.20 hm^2，年平均破坏土地 112.99 hm^2，植被恢复成本费用 3 万元/ hm^2	338.98

(2)矿区生态修复保证金执行情况

根据山东省财政厅和国土资源厅发布的鲁财综 81 号文件，山东省矿山地质环境治理保证金管理暂行办

法通知,矿山生态修复保证金收缴标准为:

每年应收缴的保证金金额=收缴标准×采矿许可证批准面积×影响系数。

龙口矿区开采方式为地下开采,采矿方法为允许地表塌陷,许可开采面积为北皂矿区 29.6 km^2,梁家煤矿 48 km^2,总约 80 km^2,年均应交保证金金额约为 1680 万元。

(3)税收优惠

地方政府主要采取减免税等税收优惠,引导和鼓励企业购买污染治理设备,实施技术改造和节能减排,进而提高环境治理水平。根据资源税收规定,对充填开采置换出来的煤炭,资源税减征 50%。按照规定,对焦煤的税额是 8—20 元/t,对其他煤炭的税额是 0.3—5 元/t。根据龙口矿区年产量为 560 万 t,实际征收税率为 1.5 元/t,则减免的税额为 420 万元。

(4)生态经济效益

根据秦格对煤炭矿区生态环境损失预测及补偿机制分析,单位塌陷土地恢复治理后,增加有效耕地面积,土地经济效益为 36 万元/km^2[23],则龙口矿区每年土地经济效益为 1497.6 万元;植被修复每公顷生态效益为 1.15 万元/ km^2,则龙口矿区植被修复生态效益为 129.94 万元。龙口矿区每年生态修复与环境治理的生态经济效益为 1627.54 万元。

(5)地方政府监管成本

龙口市政府对龙矿集团的监管成本主要包括监测费用,监察费用与环境监管运行保障费用,监管成本如表 4 所示:

表 4 地方政府对龙口矿区的监管费用统计

Table 4 Supervision cost statistics of local government in Longkou Mining Area

费用名称 Cost name	监测费用 Cost of mensuration	监察费用 Cost of supervision	宣传费用 Publicity fee	环境信息能力建设 Construction of information capacity	环境监管运行保障 Environment supervision and operation indeminty
金额 Sum/万元	131.10	34.80	2.50	3.20	46.30

数据来源:烟台市统计局,烟台统计年鉴 2014 年,2015.03

将以上数据代入演化博弈支付矩阵表 1,可得在不同的 k 值下,系统要想达到社会所期望的理想状态即煤炭企业完全修复地方政府监管的良好状态,需满足以下条件:

$$\{-1476.32+420>-1476.32k-1680\theta+(1-\theta)420-217.90+1680\theta+(1-\theta)(k1627.54-420)>k1627.54$$

由此,可以得出不同修复比例状态下,地方政府的监管努力度如表 5 所示:

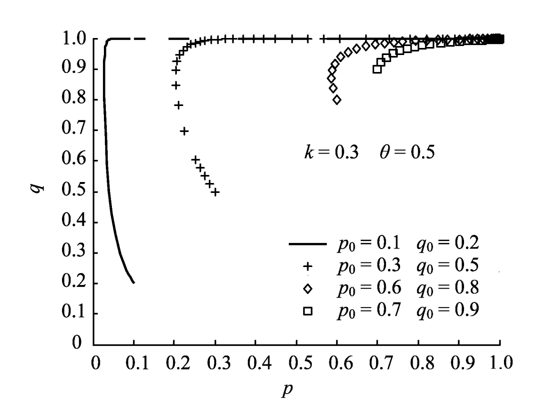
表 5 不同治理比例下系统演化为不同状态的监管努力度

Table 5 System evolutionary to different Supervision degree under different recovery degree

k 值	ESS=(1,1)	ESS=(0,0)	ESS=(1,1)和(0,0)	k 值	ESS=(1,1)	ESS=(0,0)	ESS=(1,1)和(0,0)
0.2	$\theta>0.562$	$\theta<0.191$	—	0.6	$\theta>0.281$	$\theta<0.237$	—
0.3	$\theta>0.492$	$\theta<0.201$	—	0.7	$\theta>0.252$	$\theta<0.210$	$0.210<\theta<0.252$
0.5	$\theta>0.393$	$\theta<0.223$	—	0.8	$\theta>0.269$	$\theta<0.140$	$0.140<\theta<0.269$

为更直观的说明问题,采用 Matlab 软件进行数值分析,图 1 描述不同的修复比例和监管力度下,系统在不同的初始状态下的演化图。

由图 1 所知,当煤炭企业的生态修复比例为 0.3 时,当地方政府的监管努力度大于 0.492 时,如图 1a 不管系统的初始状态如何,系统最终演化为地方政府监管,煤炭企业完全治理的良好状态,随着生态修复比例提高且不超过 0.7 时,地方政府的监管努力度随着生态修复比例的提高可以适度降低,当 $k=0.7$ 时,只要监管努力度 $\theta>0.252$,如图 1b 不管系统的初始状态如何,系统仍能达到地方监管,煤炭企业完全治理的良好状态。因此,政策实施初期,生态修复比例较低,地方政府应加大监管力度,才能使系统向最优状态演化,并且当煤炭企



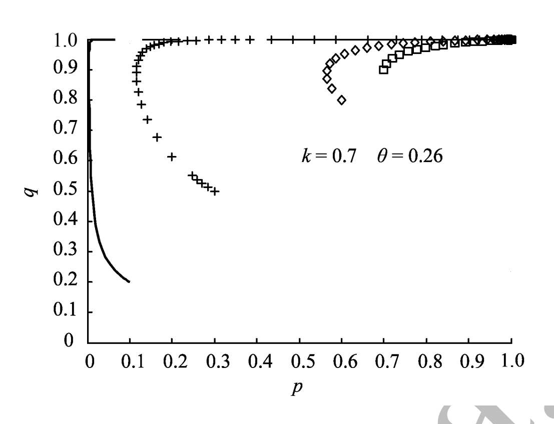


图 1　不同初始状态下 k、θ 变化对系统演化的影响

Fig.1　Influence of system evolutionary by k, θ change in different initial states

业的生态修复比例在一定范围内逐渐提高时,地方政府的监管力度可以适度地降低,但不低于一定的界限。

由图 2 可知,当生态修复比例提高到 k>0.7 时,当 k=0.8 时,当监管努力度满足 0.14<θ<0.269,如图 2a 所示,当 θ=0.26 时,系统在不同的初始状态下,会演化为不同的演化稳定策略,而不是全部演化为政府监管、煤炭企业完全治理的状态。当 θ>0.269 时,如图 2b 所示不管系统的初始状态如何,系统最终演化为政府监管,煤炭企业完全治理的良好状态。因此,当煤炭企业的生态修复比例超过一定值时,放松监管,会导致系统演化为企业部分治理与完全治理并存的状态,为确保系统向最优状态演化,地方政府应再次加大监管努力度。

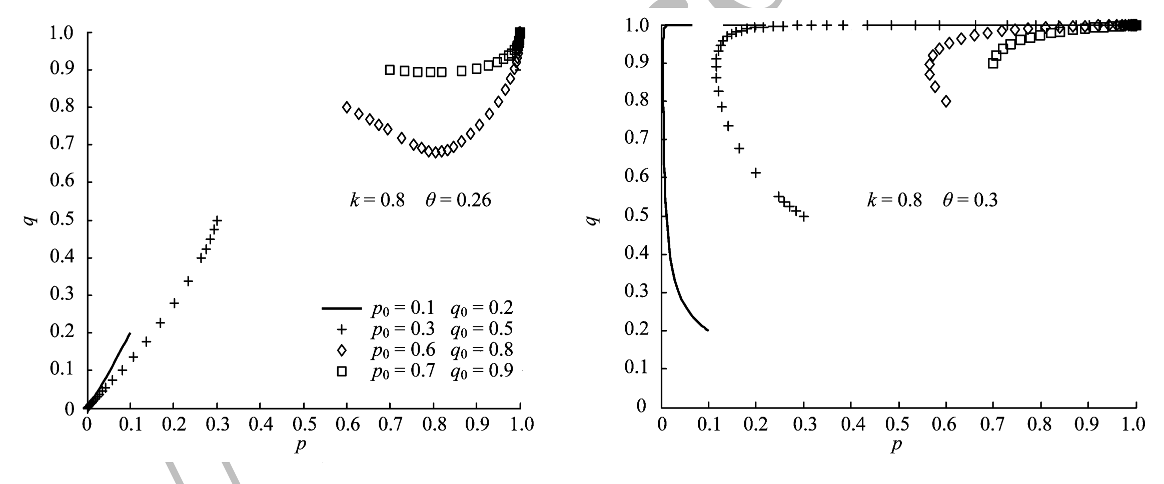


图 2　不同初始状态下增加 k、θ 值变化对演化结果的影响

Fig.2　Influence of system evolutionary by increasing k, θ in different initial states

由图 3 与图 2a 相比较,在既定的生态修复比例 k=0.8 和监管力度 θ=0.26 条件下,增加保证金的上缴金额 T=2000 万元,在不同的初始状态下,系统最终演化为监管-完全治理的状态。同样,降低监管成本,S=150 万元,不管系统的初始状态如何,系统最终演化为监管-完全治理的良好状态。通过以上分析可知:

(1)随之生态修复比例 k 提高,系统要达到均衡策略(1,1),即煤炭企业完全治理,地方政府监管的状态,地方政府的监管力度会适度降低,生态修复比例 k>0.7 时,监管力度又会逐渐加大。因为,龙口矿区生态修复保证金制度实施初期,制度尚不完善,企业治理积极性不高,龙口市政府必须加大监管力度,保证矿区生态恢复的有序进行,随着生态修复比例提高,龙口市政府可以适度降低监管力度。烟台市国土资源局公布的数据显示,龙口矿区的生态修复比例在 0.6—0.7 之间,因此,龙口市政府监管力度要大于 0.28,才能保证矿区环境的良好治理,系统的监管力度小于 0.2,系统最终演化为监管不力,部分治理的不良状态。加大对地方政府环保执法的问责力度,促使政府监管经常化制度化,保证系统向监管有力-完全治理状态演化。

(2)在既定的监管水平下,为促进系统向良好状态演化,可以适当增加保证金的缴纳金额,尤其是随着生

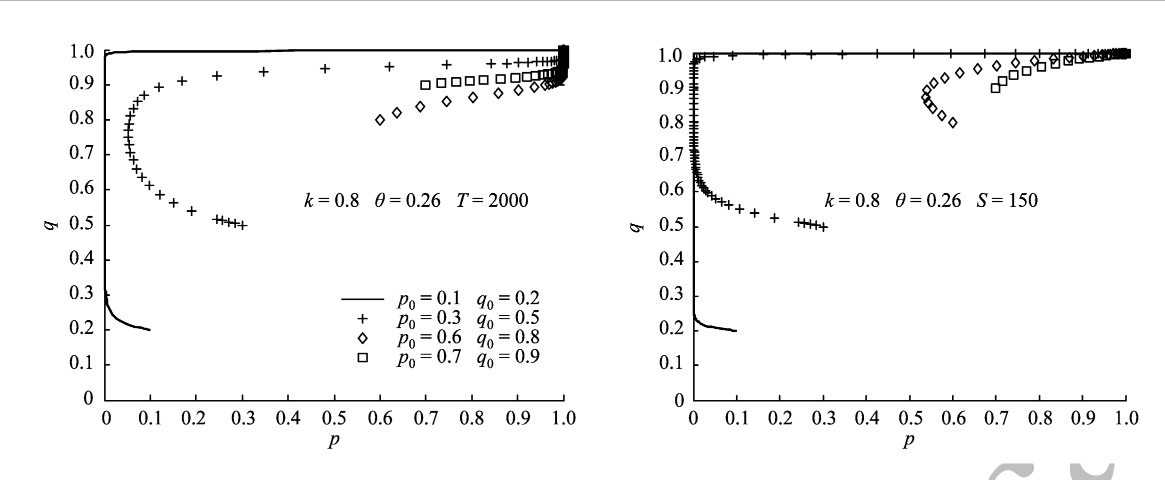


图 3 不同初始状态下,*T*、*S* 变化对演化结果的影响

Fig.3 Influence of system evolutionary by *T*, *S* change in different initial states

态恢复工程的推进,在生态修复后期,剩余保证金的缴纳金额应适度提高。目前龙口矿区自 2006 年实施生态修复保证金制度,到 2014 年,实际应缴保证金为 1.512 亿元,但据调查,实际缴纳保证金金额为 9000 万元,占应收金额的 60%,可见,矿山环境治理修复保证金收缴金额严重不足,严重影响系统向最优状态演化。加强对煤炭开采造成环境损害的预评估和采后的生态恢复评价,地方政府对煤炭企业严格执法、追责问责,促使煤炭企业提高生态修复比例。

3 结论与建议

以博弈方有限理性为前提,运用演化博弈分析对于生态修复保证金制度实施中,地方政府环境监管部门和煤炭企业的演化过程,研究监管努力度与生态修复比例之间的关系,剖析了影响双方策略演化的相关因素,为进一步完善生态修复保证金制度提供了理论依据。博弈均衡分析的主要结论如下:

(1)保证金制度实施初期,企业治理积极性不高,地方政府应加大监管力度对其进行监督引导,随着生态修复比例的提高,地方政府容易放松监管,导致煤炭企业部分治理环境。因此,在保证金制度实施过程中,为避免政府监管的随意性和不作为,建立统一的权威领导小组监管生态修复与环境治理工作,将监管工作制度化,确保监管的频率和效率。同时,地方政府充分运用税费减免、财政补贴、设立生态修复专项配套资金等政策降低企业生态恢复与环境治理成本,通过惩罚约束与激励措施促使企业自愿承担开展矿区生态修复的责任。

(2)地方政府的监管成本过高,高于监管发现所避免的损失,则地方政府可能选择监管也可能选择监管不力,当煤炭企业生态修复比例较低时,地方政府一定监管;但随着生态修复比例的提高,既使地方政府监管不力,企业只要完全治理,地方政府同样能获得政绩提升;随着政府监管放松,反过来又刺激企业降低生态修复比例。因此,应加强与高校、科研院所、生态修复专业企业的深度合作,完善生态修复保证金制度和生态修复后评估机制,为政府实施有效监管提供技术支持和政策咨询,降低地方政府的监管成本。

(3)完善现有地方政府的政绩考核体系,将生态恢复与环境治理程度、矿区居民对环境质量的满意度等指标纳入政绩考核体系,逐步加大生态环境质量指标的权重系数,对地方政府任期内的生态环境质量变化情况进行重点考核,以考核结果作为官员选拔任用的主要依据之一。同时,加大对地方政府环保执法的问责力度。

(4)生态恢复与环境治理保证金制度下,地方政府与煤炭企业的动态演化是漫长而缓慢的过程,系统的最终演化路径依赖于初始状态下博弈主体对各自策略的选择比例,由参与者的收益大小所决定的需要双方基于长远利益进行决策,前提是要建立科学合理的生态修复保证金制度。本文的定量研究结果,为确定合理有效的保证金数额提供了理论依据。建立科学的预算体系,实现保证金收缴形式的多样化,允许采取不同的缴

纳方式和缴纳比例,减少煤炭企业的资金占用,提高其生态修复的积极性,同时加强对保证金收缴的监督检查,对拒绝缴纳或少缴的主体依法追究相应的法律责任。

本文的不足之处在于,模型假设中采取的几个关键的利益因子,未能完整的体现煤炭开采行业环境治理的所有利益诉求,后续的研究工作将进一步探寻更有针对性的博弈模型。

参考文献(References):

[1] 财政部,国土资源部,环保总局. 财政部 国土资源部 环保总局关于逐步建立矿山环境治理和生态恢复责任机制的指导意见.(2006-02-10).http://www.mlr.gov.cn/pub/mlr/documents/t20060614 74659.htm.

[2] Shogren J F, Herriges J A, Govindasamy R. Limits to environmental bonds. Ecological Economics, 1993, 8(2):109-133

[3] Costanza R, Perrings C. A flexible assurance bonding system for improved environmental management.Ecological Economics, 1990,2(1):57-75.

[4] Gerard D. The law and economics of reclamation bonds.Resources Policy, 2000, 26(4): 189 -197.

[5] Peck P, Sinding K. Financial assurance and mine closure: Stakeholder expectations and effects on operating decisions. Resources Policy,2009,34(4):227-233.

[6] 张凤麟.发达国家矿地复垦保证金制度及对中国的启示.中国矿业,2006,15(9):5-8.

[7] 陈德敏,喻寄宏.关于构建矿业保证金制度的初步研究.政法论丛,2007, (5):45-51.

[8] 燕守广,沈渭寿,邹长新,刘发民.矿山环境治理恢复保证金制度理论与实践.环境科学与技术,2012,35(61):423-427.

[9] 冯春涛,郑娟尔.矿山地质环境治理恢复鼓励政策设计研究.中国人口·资源与环境,2014,24(S3):48-51.

[10] 张维宸.我国矿山地质环境治理恢复保证金制度的法律思考.中国矿业,2011,20(11): 43-45,63-63.

[11] 程琳琳.矿区土地复垦保证金制度实践现状及研究进展.中国矿业,2010,19(1):33-36.

[12] 徐大伟,杨娜,张雯.矿山环境恢复治理保证金制度中公众参与的博弈分析:基于合谋与防范的视角.运筹与管理,2013,22(4):20-25.

[13] Smith J M, Price G R. The Logic of Animal Conflict. Nature, 1973, 246(5427):15-18.

[14] Taylor P D, Jonker L B. Evolutionary Stable Strategies and Game Dynamics. Mathematical Biosciences, 1978, 40(1/2): 145-156.

[15] Friedman D. Evolutionary games in economics.Econometrica,1991,59(3):637-666.

[16] Akiyamaa E, Kanekob K.Dynamical systems game theory and dynamics of games. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2000, 147(4):221-258.

[17] Zhao R, Neighbourb G, McGuirea M, Deutz P.Using game theory to describe strategy selection for environmental risk and carbon emissions reduction in the green supply chain. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2012, 25(6): 927-936.

[18] 钟锦.基于演化博弈的淮河流域水环境管理研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2008.

[19] 潘峰,西宝,王琳.基于演化博弈的地方政府环境规制策略分析.系统工程理论与实践,2015,35(6):1393-1404.

[20] 吕军,李利,候俊东.矿山地质环境治理主体间的博弈分析.中国人口·资源与环境,2012,22(11):124-129.

[21] 张学刚,钟茂初.政府环境监管与企业污染的博弈分析及对策研究.中国人口·资源与环境,2011,21(2):31-35.

[22] 赵黎明,陈喆芝,刘嘉玥.低碳经济下地方政府与旅游企业的演化博弈.旅游学刊,2015,30(1):72-82.

[23] 秦格.生态环境损失预测及补偿机制——基于煤炭矿区的研究.北京:中国经济出版社,2011.